トンネル内の自転車追越し時における自動車走行特性

岡澤　桜[1]・小林　恵大[2]・櫻井　淳[3]・松本　修一[4]・吉田　長裕[5]・山中　英生[6]

[1]非会員　文教大学　情報学部　情報社会学科（〒253-8550 神奈川県茅ヶ崎市行谷 1100）
E-mail:c1p41020@bunkyo.ac.jp
[2]非会員　元文教大学　情報学部　情報社会学科（〒253-8550 神奈川県茅ヶ崎市行谷 1100）
[3]正会員　文教大学専任講師　情報学部　情報システム学科（〒253-8550 神奈川県茅ヶ崎市行谷 1100）
E-mail:sakuraij@bunkyo.ac.jp
[4]正会員　文教大学准教授　情報学部　情報社会学科（〒253-8550 神奈川県茅ヶ崎市行谷 1100）
E-mail:shuichi@bunkyo.ac.jp
[5]正会員　大阪公立大学　大学院准教授　工学部（〒558-8585 大阪府大阪市住吉区杉本 3-3-138）
E-mail:yoshida@gm.osaka-cu.ac.jp
[6]正会員　徳島大学大学院　研究部長　社会産業理学部（〒770-8506 徳島県徳島市南常三島 2-1）
E-mail:yamanaka.hideo@tokushima-u.ac.jp

プローブ自転車を活用した離隔距離の研究では，道路構造や利用者属性等をもとに離隔距離の要因を探る研究が数多くなされているが，決定的な結論が出ていない要因が数多く存在することが指摘されている．その中で，トンネル部における離隔距離等の知見は殆ど存在しない.本研究では，片側２車線のトンネルにおいて，離隔距離等の影響を評価する実験を行った．その結果，１．トンネルの中部と外部で比較すると，離隔距離はトンネルの外部の方が広い傾向にある２．トンネル内外で比較すると，自転車が危険に感じる離隔距離は，トンネル内部の方が短い傾向にある等の知見が得られた．

Key Words: *probe Bicycle，Passing Distance，Bicycle，Tunnel*

1.　はじめに

車道の単路部に関しては，SIPの調査で事故件数に対する事故死者数が非常に多いことが指摘されている[1)]．この傾向は海外でも同様で，Transport for London[2)]の調査では，自転車事故の死因の中で，自転車による追越し時の衝突が最も大きな要因であると指摘している．

また，米国運輸省道路交通安全局(NHTSA)の調査[3)]によると，2013年に発生した自転車の死傷事故のうち57%が交差点部以外であることを指摘している．また，スウェーデンでは自転車利用者が最も受傷しやすい道路利用者であり，自転車と自動車の衝突事故において自転車利用者が重傷を負う危険性が高いことが指摘されている[4)]．

このように自転車事故を自転車の事故において，自転車利用者が重大事故に繋がることは，先進国では共通の事象である．このような自転車事故や自転車に対する安全性に関する現象解析等のために，プローブ自転車を用いた研究が，2013年以降欧米を中心に活発になってきている[5)]．

また，自動車の自転車追越し時の衝突事故を抑止するため，自動車が自転車を追越す際，自転車から一定以上の距離を保って走行する法律(Minimum Passing Distance Law 以下

表-1　諸外国におけるMPDL

国名	州	離隔距離	法律の施行年
オーストラリア	クイーンズランド	60km/h以上:1.5m 60km/h以下:1m	2016年
ベルギー	-	1m以上	1975年
カナダ	オンタリオ	1m以上	2017年
フランス	-	都市部：1m以上 郊外：1.5m以上	2003年
スペイン	-	1.5m以上	2003年
アメリカ	フロリダ	3ft以上	2012年
	カリフォルニア	3ft以上	2014年
	ルイジアナ	3ft以上	2010年
	メリーランド	3ft以上	
	ミシガン	3ft以上	
	ミネソタ	3ft以上	
	ウィスコンシン	3ft以上	1973年

“MPDL”と記す)が，欧米を中心に施行されている(表-1参照)[6].

自転車研究に対する自動車の離隔距離に関する研究は，1977年のKroll and Rameyの研究[7]が始まりとされており，その後，様々な研究がなされてきた．Walker[8]の研究では，超音波センサを自転車に搭載し，自動車との離隔距離に関してヘルメットの有無，女性と男性，自転車の走行位置等による比較を行い，自動車ドライバが自転車利用者の外見に対して敏感に反応することを指摘している．また，Chuang et al.[9]の研究では，超音波センサ，３軸加速度センサ等を搭載したプローブ自転車を用いて，自動車の自転車追越時の離隔距離に関するデータを収集した．この研究では，１．離隔距離に関しては，車種，性差，路面状況等で差があること，２．追越時の速度は，自転車レーンの有無などの道路構造の要因では差があるが，車種や性差では有意な差がないことの結果を得ており，Walker[8]の研究結果を支持している．その一方，Love et al[10]の研究では，メリーランド州において，男性４名女性１名のモニターを対象に，カメラを搭載した自転車を用いて，離隔距離を計測する実験を行った．この研究では，１．車線幅員が広くなる程，離隔距離が広がること，２．自転車レーンがある区間では離隔距離が広がる等の結果を得ている．また，女性と男性のモニターで比較すると，３フィート(約0.91m)以下の離隔距離をとる自動車の割合が，男性に比べ女性の方が少ないことを指摘しているが，性差で離隔距離があるか否かに関しては，決定的な結論が出せないと述べている．また，Schakel and Parkin[11]の研究では，超音波センサおよびカメラを搭載したプローブ自転車を活用して，制限速度20マイル(約32km/h)と30マイル(約48km/h)の道路において，自動車の追越時の離隔距離と速度の計測実験を行い，道路構造と自動車の要因を分析した．この結果，自転車レーンが離隔距離と追越速度に与える影響がない可能性に言及している．

また，道路構造の要因，自動車の要因のみではなく，自転車利用者の危険感等の心理的要因を加味した研究もみられるようになっている．Beck et al.[12]は、プローブ自転車に危険に感じた際の状況を報告する機能を付加した．そして，平均年齢39.3歳の被験者に対して自転車追越時の離隔距離を収集し，不安に感じたデータと不安に感じなかったデータに分類した．その結果，18,527件の離隔距離のデータから危険に感じた際の離隔距離の平均値が0.98m，危険に感じなかった時の離隔距離の平均値が1.7mであったことを報告している．また，Reasch et al.[13]は，追越時の自転車の安全性を考える際に，自転車および自動車の両者の危険感を加味することが重要であると指摘しており，危険感に関するデータを収集可能なデバイスをプローブ自転車に搭載して，20～50代の被験者を対象にデータ収集を行った．

これらプローブ自転車を活用した離隔距離

表-2　既存研究の整理

Country of study	Year	Passing events recorded	トンネルの有無
UK	2010	671	対象外
Canada	2015	5227	
NewZealand	2016	6268	対象外
USA	2012	568	記述なし
UK	2014	5690	対象外
Taiwan	2013	1380	対象外
USA	2012	1151	
Sweden	2016	145	対象外
Spain	2017	2928	対象外
Australia	2019	18,527	対象外
Australia	2021	16,476	記載なし
CANADA	2020	3591	
USA	2021	2838	対象外
Australia	2018	1846	記載なし
Australia	2021	18527	記載なし
UK	2014	463	対象外
USA	2020	120	対象外
Italy	2021	134	対象外
JAPAN	2018	288	対象外
FRANCE	2020	1296	対象外
Australia	2018	1113	対象外
Australia	2018	1846	記載なし
Australia	2020	224	対象外

表-3　単路部における重大事故率

信号：施設なし	軽傷	重傷	死亡	計	重大事故率
トンネル	212	85	8	305	30.5%
橋	191	47	10	248	23.0%
カーブ屈折	2,722	453	30	3,205	15.1%
単路(その他)	58,611	4,956	295	63,862	8.2%

の研究では，道路構造や利用者属性等をもとに離隔距離の要因を探る研究が数多くなされているが，決定的な結論が出ていない要因が数多く存在することが指摘されている[14].

例えば，Shackel and Parkin[15]の研究では，複数車線の道路では片側 1 車線の道路より離隔距離が広くなる傾向にあると述べている．その一方で，Apasnore et al. [16]の研究では，統計的に有意な差がないとの結果が得られている．また，単路部における路上駐車の存在が離隔距離に与える影響としては，Apasnore et al. [16]の研究では離隔距離が大きくなると結論付けているが，Beck et al. [12]では，離隔距離は短くなるとの結果が得られている．

多くの論文で引用されているWalker[8]の研究では，ドライバは自転車利用者の外見等が離隔距離に大きな影響を与えることを証明しており，その一例として自転車利用者が女性の場合，離隔距離は大きくなることを示した．この結果に対して，Haworth et al. [17]の研究では，統計的に有意な差が出ていないとの結果が出ている．また，Evans et al. [18]の実験では，7.6cm短くなるとの結果が得られている．

次に，Caliendo[19]が，一般道での交通事故に関する研究は多くなされているが，トンネル内での事故に関する研究事例が少ないことを指摘している．離隔距離に関する研究に関しても，既存の研究事例でトンネル内を扱った事例は殆ど存在しない(表-2参照）．

単路部での自転車事故に関しては，筆者が参画するプロジェクトにおいて，小嶋[20]が日本の事故データをもとに単路部における自転車事故の重大事故率を比較した結果，トンネル部での重大事故率が高いことが分かっている(表-３参照)．トンネル内は，暗く，狭隘で単調な空間であるため，ドライバにとって不安に感じさせることが指摘されている[21]が，トンネル内での自転車利用者の意識や自転車と自動車の追越し時の挙動に関しては未着手な点が多いので，本研究ではトンネル内外での比較実験を行った．

2.　実験概要

(1)　プローブ自転車の概要

本研究では，超音波センサおよびカメラ等を備えたプローブ自転車を使用した．自動車の速度に関しては，自転車に搭載したカメラを用いて，後カメラの後方3mから計測を開



図-1　プローブ自転車の概要

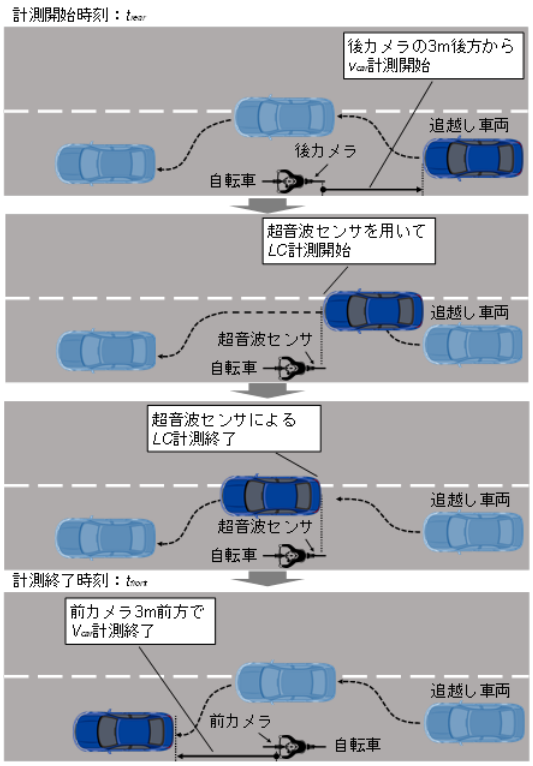


図-2　追越時のデータ収集の概要

表-4　トンネルの概要

名称	全長(m)	車線数	幅員(m)	制限速度
吉浦隧道	216.1	2	8.1	40
新長浦隧道	235.1	2	8.25	40
新吾妻隧道	151.3	2	8.3	40
新田浦隧道	118.8	2	8.25	40
田浦隧道	114.9	2	8.1	40
吾妻隧道	86.9	2	8.1	40
長浦隧道	192.9	2	8.1	40
新吉浦隧道	259.4	2	8.25	40
新逸見隧道	147.6	2	8.25	40

始し，後カメラから前カメラまでの距離0.91mを通過した後，前カメラの3m前方で計測を終了した．そして，その距離を通過する時間を計測し，時間差をもとに式1のように計算した．

$$v_{car} = \frac{6.91}{t_{front} - t_{rear}} \times 3.6 + v_{bike} \quad (1)$$

ここで，v_{car}（km/h）を自動車の速度，v_{bike}（km/h）を自転車の速度，t_{front}を前カメラの計測開始時刻，t_{rear}を後カメラの計測終了時刻とする．また，離隔距離に関しては，自転車の後ろカゴの右側面に横向きに設置した超音波センサ（HC-SR04）を用いて，自転車から自動車の側面までの距離を約7Hzで常時記録し，追越し時に測定された複数の値の中で最短となる値を使用した．

(2)　実験場所・被験者

本研究では，横須賀市の国道16号線の吉浦隧道～新逸泉隧道区間において走行実験を行った．この道路は，片側２車線で制限速度40km/h，走行距離3.2kmの単路であり，この区間に９か所のトンネルが存在する．各トンネルの概要を表-４として示す．実験対象となったトンネルには，LEDとナトリウム灯を用いたトンネル（以下「「混合」と記す）とナトリウム灯（以下「黄色」と記す）を用いた２種類の照明が存在する．また，国土交通省の調査によると当該道路の交通量は，昼間12時間（朝８時～夜８時）で20,609台である．

表-5　被験者の属性

	年齢	性別	右（視力）	左（視力）	自転車に乗る頻度
A	20歳	女	1.5	1.5	月に一回程度
B	21歳	男	1.2	1.2	週に1~2回程度
C	21歳	女	1.5	1.7	月に一回程度
D	22歳	男	1	1	月に一回程度
G	21歳	男	1.3	1.5	2~3か月に一回程度
H	21歳	男	1.5	1.5	2~3か月に一回程度
I	20歳	男	1.5	1.5	週に1~2回程度
J	20歳	男	1.5	1.5	週に1~2回程度
K	21歳	女	0.8	0.8	めったに利用しない
L	22歳	男	0.6	0.7	週に3~4回程度
M	20歳	男	1	1	週に1~2回程度

表-6　サンプルの内訳と追越挙動の計測結果

	サンプル数	離隔距離の平均	標準偏差	自動車の平均速度	標準偏差	自転車の平均速度	標準偏差
男	311	115.4	33.28	44.7	10.09	17.1	3.28
女	160	112.3	29.38	44.3	9.10	15.4	2.85
トンネル内	230	103.7	27.07	44.3	9.16	16.0	3.11
トンネル内(黄)	96	106.1	24.52	44.5	10.26	15.7	3.53
トンネル内(混合)	131	102.0	28.92	44.1	8.38	16.2	2.79
トンネル外	241	124.5	33.11	44.8	10.30	17.0	3.29
軽	232	111.6	28.90	44.2	10.14	16.2	3.09
普通	157	110.4	33.38	43.6	7.64	16.9	3.54
大型	22	103.3	21.05	41.9	12.80	16.1	2.47
二輪	60	139.6	32.00	49.5	10.56	16.7	3.21
5s以上	46	119.6	34.89	47.7	8.52	16.8	3.03
5s以下	425	113.8	31.68	44.2	9.83	16.5	3.27

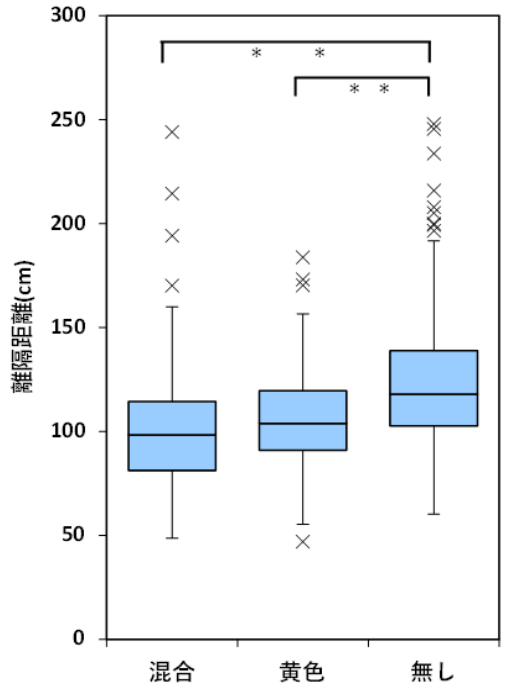


図-3　離隔距離の比較

本実験は，2022年11月9日～11月21日にかけて行った．被験者は，19～22歳の11名（男性８名、女性３名）である（表-5参照）．被験者には，実験開始前に実験により生じる実験参加者への不利益，プライバシーへの配慮，実験に参加しない自由の確保等に関して十分な説明を行った．実験の所要時間は，一人当たり実走実験で約１時間～２時間程度であった．

3.　実験結果

本実験において収集した追越し挙動は，471サンプルであった．これらの内訳および離隔距離，自転車・自動車の速度（表-6参照）となる。

(1)　離隔距離の関係

トンネル内外での離隔距離を図-3に示す．

離隔距離に対しての一元配置の分散分析を行った結果，道路構造の主効果に有意な差が見られた($F(2,469)=4.43, p<0.001$)．Tukey法を用いた多重比較によれば，「混合」（LEDとナトリウム灯）・「無し」と「黄色」（ナトリウム灯）・「無し」の間に有意傾向が示された．これらの結果から，トンネル内の照明が離隔距離におよぼす影響はないが，トンネルの内部では，トンネルの外部と比較して，離隔距離が広くなる傾向にあることが分かる．

表-7　離隔距離に関する重回帰分析の結果

変数	偏回帰係数	t値	p値
自動車速度（km/h）	0.51	3.70	P < 0.001
トンネルダミー	-19.90	-7.54	P < 0.001
大型車ダミー	-6.01	-0.93	0.3547
バイクダミー	24.26	5.49	P < 0.001
第2車線ダミー	-7.24	-1.62	0.1062
軽自動車ダミー	0.22	0.07	0.9410
定数項	105.02	13.02	P < 0.001
サンプル数		471	
重相関係数		0.22	

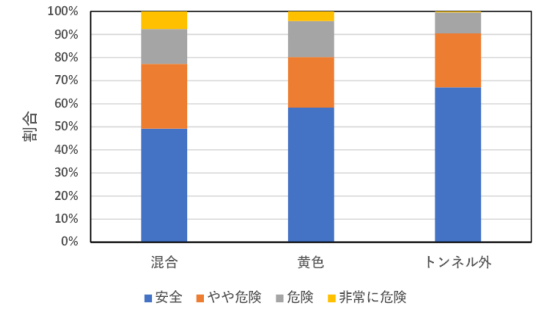


図-4　危険感の発生割合

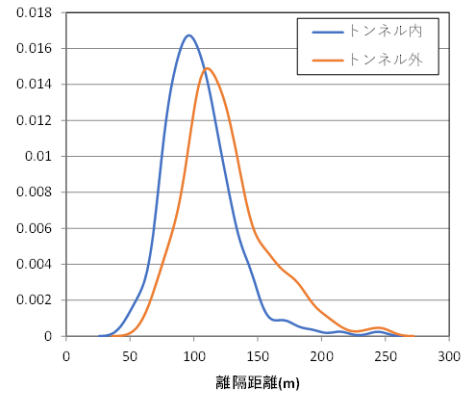


図-5　危険に感じた追越の離隔距離分布

次に，離隔距離を目的変数とし，自動車速度，トンネルの内外，車種等を説明変数として重回帰分析を行った結果を表-7に示す.この結果，１．自動車速度が高ければ高い程離隔距離が長くなり，２．トンネルの内部の方が短くなる．３．自動車に比べバイクの方が離隔距離が長くなる傾向にあることが分かる.

(2)　危険感の発生特性

トンネル内の照明ごとに危険感を割合で出したものを図-4に示す．混合の「非常に危険」の割合が黄色，トンネル外より多く占めており，安全以外の評価は全体の50.8%であり，約半分を占めていることが分かる．一方でトンネル外ではトンネル内に比べると安全の割合は変わらないことが分かった（図-4参照）．次に，被験者がトンネル内外で危険に感じた追越しの離隔距離をカーネル密度推定でプロットした．これらの結果から，自転車が危険に感じた追越しでは，トンネル内部における離隔距離の方が短いことが見て取れる（図-5参照）．

4.　結論

日本では，トンネル部における自転車の重大事故の発生割合は，単路部と比較して多い．そのような中，国際的に見てもトンネル内における自転車に対する離隔距離に関しては，知見が少ない．本研究では，トンネルが連続して存在する片側２車線の幹線道路において，プローブ自転車を用い，自動車が自転車を追越す際の離隔距離を計測するとともに，自転車利用者の危険感に関してデータを収集した．その結果，以下のような知見が得られた．

１．トンネルの内部と外部で比較すると，離隔距離はトンネルの外部の方が広い傾向にある

２．トンネルの内部と外部で比較すると，自転車が危険に感じる離隔距離は，トンネル内部の方が短い傾向にある

３．自動車とバイクを比較するとバイクの方が離隔距離の短い傾向にある

本研究では，片側２車線の道路におけるトンネル内外での離隔距離の比較を行った．離隔距離の研究では，Stülpnagel et al. [22]のように様々な道路要因が離隔距離に与える影響等の研究がなされてきた．本研究の結果は，片側２車線の道路における傾向を示すものであり,今後様々な道路環境でのトンネルにおいて同様の結果が得られるか検証を行うことが必要である．

また，自転車の追越しに関しては，ドライビングシミュレータを用い,道路環境や交通状況を自由に作り，実験者が検証したい条件に絞った比較実験，例えば（Goddard, A.D[23], Farah,Piccinini)[24]を行うことも可能である．更には,自転車を自動車が追越す際のメカニズムに関して，ドライバの危険意識，例えば（Rasch et al.）[25]，サイクリストのストレス，例えば（Venkatachalapathy）[26]の影響も加味して検証を行うことも重要である．これらの検証を踏まえ，トンネル内での自動車の安全で快適な走行空間の整備に繋げる知見を増やしていく予定である．

参考文献

1） 公益財団法人 交通事故総合分析センター，“交通事故死者低減効果見積もり解析手法に係る調査，” https://www.sip-adus.go.jp/file/504s_s.pdf, 2019.

2） Transport for London, 2005. Pedal Cyclist Casualties in Greater London. Transport for London, London.

3） NHTSA’’s National Center for Statistics and Analysis, 2015. Traffic safety facts 2013. Publication DOT HS 812 15. National Traffic Safety Administration, Washington, D.C.

4） Marco Dozza, Ron Schindler, Giulio Bianchi-Piccinini, Johan Karlsson , “How do drivers overtake cyclists?”, Accident Analysis and Prevention, Vol.88, pp.29-36, 2016.

5） April Gadsby and Kari Watkins, Instrumented bikes and their use in studies on transportation behaviour, safety, and maintenance, TRANSPORT REVIEWS, Vol.40, No.6, pp.774-795, 2020.

6） Elisabeth Rubie, Narelle L. Haworth, Divera A. M. Twisk, Naohide Yamamoto,"Influences on lateral passing distance when motor vehicles overtake bicycles: a systematic literature review", Transport Reviews, 2020.

7） Kroll, B., Ramey, M., “Effects of bike lines on driver and bicyclist behavior”, Transportation Engineering Journal of ASCE, Vol.103, pp.243–256, 1977.

8） Walker, I.: Drivers overtaking bicyclists: Objective data on the effects of riding position, helmet use, vehicle type and ap-parent gender, Accident Analysis and Prevention, Vol.39, No.2, pp.417-786, (2007).

9） Chuang, K. H., Hsu, C. C., Lai, C. H., Doong, J. L. and Jeng, M. C.: The use of a quasi-naturalistic riding method to investi-gate bicyclists' behaviors when motorists pass, Accident Anal-ysis and Prevention, Vol.56, pp.32-41 (2013).

10）Love, D. C., Breaud, A., Burns, S., Margulies, J., Romano, M. and Lawrence, R.: Is the three-foot bicycle passing law working in Baltimore, Maryland?, Accident Analysis and Pre-vention, Vol.48, pp.451-456 (2012).

11）Shackel, S. C. and Parkin. J.: Influence of road markings, lane widths and driver behaviour

on proximity and speed of vehicles overtaking cyclists, Accident Analysis and Prevention, Vol.73, pp.100-108 (2014).

12） Beck, B., Perkins, M., Olivier, J., Chong, D. and Johnson, M.: Subjective experiences of bicyclists being passed by mo-tor vehicles:The relationship to motor vehicle passing distance, Accident Analysis & Prevention, Vol.155 (2021).

13）Rasch, A., Moll, S., López, G., García, A. and Dozza, M.: Drivers' and cyclists' safety perceptions in overtaking ma-neuvers, Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, Vol.84, pp.165-176 (2022).

14）Bianchi-Piccinini, F. G., Moretto, C., Zhou, H., Itoh, M.: Influence of oncoming traffic on drivers' overtaking of cyclists, Transportation Research Part F, Vol. 59, pp. 378-388, 2018.

15）Shackel, C. S. and Parkin, J.: Influence of road markings lane widths and driver behaviour on proximity and speed of vehicles overtaking cyclists, Accident Analysis and Prevention, Vol. 73, pp. 100-108, 2014.

16） Peter Apasnore, Karim Ismail, Ali kassim Kassim.: Bicycle-vehicle interactions at mid-sections of mixed traffic streets: Examining passing distance and bicycle comfort perception, Accident Analysis & Prevention 106:141-148, 2017

17） Haworth, N., Heesch, C. K., Schramm, A. and Debnath, K. A.: Do Australian drivers give female cyclists more room when passing, Journal of Transport & Health, Vol. 9, pp. 203-211, 2018.

18）Teresa M Evans, Lindsay Bira, Jazmin Beltran Gastelum, L Todd Weiss & Nathan L Vanderford.: Evidence for a mental health crisis in graduate education, Nature Biotechnology volume 36, pages282–284, 2018

19）Ciro Caliendo, Maria Luisa De Guglielmo, Maurizio Guida, "A crash-prediction model for road tunnels", Accident Analysis and Prevention, Vol.55, pp.107-115, 2013.

20）小嶋，単路部で発生した事故に着目した道路上の走行位置別にみた自転車事故の特性分析

21）PIAR, 2008. Human factors and road tunnel safety regarding users. PIARC Technical-Committee C3.3, Road Tunnel Operation, Report R17, Paris. ISBN 2-84060-218-0.

22） Rul von Stülpnagel, Rafael Hologa, Nils Riach, "Cars overtaking cyclists on different urban road types –Expectations about passing safety are not aligned with observed passing distances", Transportation Research Part F: Psychology and Behaviour, Vol.89, pp.334-346, 2022.

23）T. Goddard, A.D. McDonald, H. Alambeigi, A.J. Kim, B.A. Anderson, "Unsafe bicyclist overtaking behavior in a simulated driving task: The role of implicit and explicit attitudes", Accident Analysis and Prevention, Vol.144, 2020.

24）Haneen Farah, Giulio Bianchi Piccinini, Makoto Itoh, Marco Dozza, "Modelling overtaking strategy and lateral distance in car-to-cyclist overtaking on rural roads: A driving simulator experiment", Transportation Research Part F, Vol.63, pp.226-239, 2019.

25）Alexander Rasch, Sara Moll, Griselda L´opez, Alfredo García, Marco Dozza, "Drivers' and cyclists' safety perceptions in overtaking

26） Archana Venkatachalapathy, Cara

Hamann, Steven Spears, Elizabeth A. Shirtcliff, Anuj Sharma, "A naturalistic study assessing the impact of daytime running lights and vehicle passing events on cyclist's physiological stress", Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, Vol.16, 2022

（2023.10.13受付）